

## 浅析城市轨道交通永磁牵引系统技术

金四虎

北京京港地铁有限公司 北京

**【摘要】**随着城市生活节奏的加快，在大城市的大客流等地区对城市轨道交通提出了更高要求，快起快停、节能降耗、高效率已经成为城市轨道交通牵引系统的发展趋势，既有的异步电机已经无法满足更加严峻的牵引系统需求。因此，永磁牵引系统应运而生，本文对永磁牵引系统分析、对比，研究永磁牵引系统对城市轨道交通发展的影响。

**【关键词】**城市轨道交通；交通车辆；永磁牵引

### Analysis of permanent magnet traction system technology for urban rail transit

SiHu Jin

Beijing Jinggang Metro Co., Ltd. Beijing

**【Abstract】** With the acceleration of urban life rhythm, higher requirements are put forward for urban rail transit in areas such as large cities with large passenger flow. Quick start and quick stop, energy saving and consumption reduction, and high efficiency have become the development trends of urban rail transit traction systems. Existing asynchronous motors have been unable to meet the more severe demands of traction systems. Therefore, the permanent magnet traction system came into being. This paper analyzes and compares the permanent magnet traction system, and studies the influence of the permanent magnet traction system on the development of urban rail transit.

**【Keywords】** Urban rail; Traffic vehicle; Permanent magnet traction

基于永磁电机牵引系统已经在轨道交通、风力发电、电动汽车、空调、船舶推进等诸多行业得到了广泛的应用。国外基于永磁电机牵引系统从 20 世纪 90 年代开始在轨道交通领域研究应用，目前已处于商业化推广阶段，永磁电机牵引系统在国外轨道交通的各车型均有成功应用，例如法国 AGV、日本 E954 等。我国从 21 世纪开始轨道交通基于永磁电机牵引系统的基础研究工作，并于 2014 年成功实现在新一代高速动车组上装车应用。

#### 1 永磁牵引电机介绍

永磁牵引系统由牵引变压器、牵引变流器和永磁牵引电机组成，其中牵引变压器与异步牵引系统完全一致，牵引变流器和永磁牵引电机与异步牵引系统不同。

##### 1.1 结构

永磁电机由定子、转子、基座等部件组成，如

图 1，其中定子、基座与异步电机相同，永磁牵引电机转子由铁心、永磁体组成，在非传动端设置旋转变压器测量永磁体位置。转子可以制成实心的形式，也可以由叠片压制而成，其上装有永磁体材料。

##### 1.2 原理

永磁牵引电机工作原理：三相逆变器给电机定子三相绕组供电，三相对称电流合成的旋转磁场与转子永磁体所产生的磁场相互作用产生转矩，进而拖动转子同步旋转。当气隙合成磁场滞后于转子主磁场时，产生的电磁转矩与转子旋转方向相反，这时电机处于发电状态；相反，当气隙合成磁场超前于转子主磁场时，产生的电磁转矩与转子旋转方向相同，这时电机处于电动状态，如图 2。

##### 1.3 优势

永磁牵引电机采用永磁体励磁，无需励磁电流，转子无铜耗，定子铜耗相对较小、电机效率高，相

比异步电机，效率提高约 3%~5%。功率密度大、噪音低、质量轻，节能降耗，低扭输出能力强，便于

车辆的低速启动。

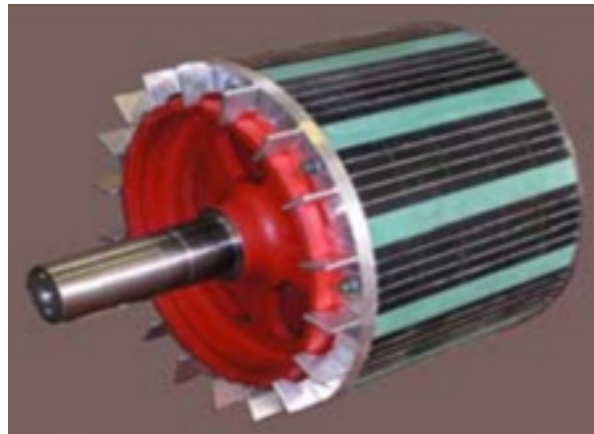


图 1 永磁电机转子

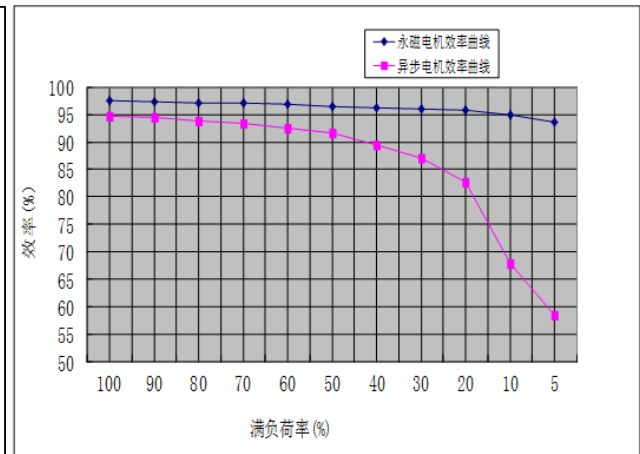
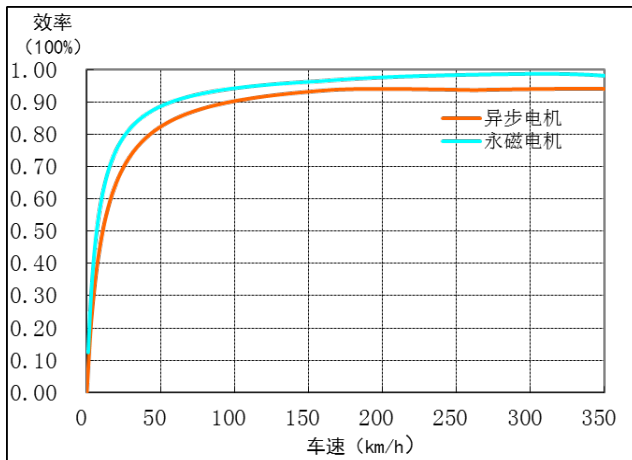


图 2 永磁电机和异步电机效率对比图

### 1.4 关键技术

为满足牵引电机高效节能、高功率密度、高转速、大扭矩、高可靠性、低噪音的要求，永磁电机面临的关键技术：

#### (1) 电磁设计技术

为满足永磁电机的同步变频调速控制，需要获得在整个工作转速范围内电机交、直流电感和空载漏磁等参数，利用 ANSOFT 电磁场有限元建立电机电磁模型仿真分析。

#### (2) 抗失磁技术

引起永磁体不可逆退磁的因素主要有机械振动冲击、冲击电流、高温。选用不同磁路结构、不同永磁材料，验证永磁体抗失磁性能，最终完成振动

冲击试验、短路电流试验、温升试验。

#### (3) 温升控制技术

不同磁钢材料会在不同温度下失效，合理分配控制电机铁耗和铜耗、电机风路导向设计，是永磁电机的关键技术。

#### (4) 永磁电机控制技术

永磁电机面临弱磁控制、带速重投控制等控制难点，通过不断优化控制软件，完善控制策略。

### 1.5 保护措施

温度保护：设置定子温度传感器实时监测牵引电机温度；

转速监测：设置旋转变压器监测转子速度，当传感器故障时切除该电机；

防止反电动势：设置隔离接触器，当逆变器停止动作或出现故障时，断开隔离接触器，防止反电动势冲击 IGBT 模块。

2 永磁牵引系统与异步牵引系统的对比分析

永磁牵引系统与异步牵引系统的变流器、电机存在差异，但对变压器要求相同，对比分析变流器与牵引电机方案的差异。

2.1 异步牵引变流器与永磁牵引变流器

(1) 异步牵引变流器方案

异步牵引变流器采用主辅充电机一体化设计，包含两重整流以及两重逆变，共用中间直流回路，牵引电机为车控或架控方式。单个变流器中包含充电单元、四象限脉冲整流器、中间直流环节、VVVF 逆变器、过压斩波单元、辅助逆变器、辅助滤波变压器、DC110V 充电机等。

(2) 永磁牵引变流器

永磁牵引变流器采用主辅充电机一体化设计，包含两重整流以及四重逆变，均共用中间直流回路，牵引电机为轴控方式。单个变流器中包含充电单元、

四象限脉冲整流器、中间直流环节、VVVF 逆变器、隔离接触器、过压斩波单元、辅助逆变器、辅助滤波变压器、DC110V 充电机等。

(3) 技术分析

从电路结构、设备尺寸重量及成本等角度分析异步牵引变流器与永磁牵引变流器的不同，对比方案差异如表 1。

相比于异步牵引变流器，永磁牵引变流器方案有以下变更：

- ①内部增加了两个逆变模块和四个隔离接触器及其他部件；
- ②箱体尺寸待校核，重量增加了 200kg；
- ③若采用永磁牵引变流器，则设备制造和购置成本将大幅提高。

2.2 永磁牵引电机发生匝间故障的分析

见表 2。

3 检修维护

运营维护方面，永磁牵引系统也有着明显优势，根据修程对比分析，如表 3。

表 1 异步变流器与永磁变流器对比分析

参数	异步变流器方案	对应的永磁变流器要求
主电路结构	架控	轴控
	两重整流、两重逆变	两重整流、四重逆变
	无	4 个隔离接触器
尺寸、重量	4290mm×2340mm×650mm	4290mm×2340mm×650mm（待校核）
	≤3200kg	≤3400kg
成本因素	二重逆变器	采用四重逆变器，增加了 IGBT、分配板、驱动板、电压传感器；
	架控方案	采用轴控方案；
	无	主电路增加四个隔离接触器；
	直接转矩控制	矢量控制技术、弱磁控制技术；

表 2 永磁电机与异步电机发生匝间故障

匝间短路	异步牵引电机	与异步电机异同点
发生概率	概率低	相同
系统保护措施	封脉冲	封脉冲+断隔离接触器
对车辆运行影响	列车损失单架两台电机动力运行，不影响运营	列车损失单电机动力运行，不影响运营
电机损伤	系统保护动作后，故障损伤不会进一步扩大	由于转子磁场存在，系统保护动作后，定子线圈故障点损伤扩大，直至烧断为止。牵引电机定子线圈绝缘采用阻燃材料，在烧断过程中电机不会起火影响行车安全。
处理措施	更换电机	相同

表 3 永磁牵引系统与异步牵引系统检修维护对比分析表

序号	修程	检修内容差异说明	备注
1	一级修	相同	
2	二级修	相同	
3	三级修	1.永磁电机不需转子检查; 2.永磁电机减少了堵转试验、空载试验、速度传感器出厂检测试验;	增加项点: 1.永磁电机增加了旋转变压器绝缘性能测试、旋转变压器与永磁电机之间零位角度测量、空载反电势试验、稳态短路试验; 2.速度传感器检查相关工作换成旋转变压器检查相关工作; 3.电机解体后, 需要避免转子对外的电磁辐射与干扰。
4	四级修	差异同三级修	
5	五级修	1.永磁电机不需清理转子灰尘, 不需进行转子导条端环检查; 2.永磁电机减少了堵转试验、空载试验、速度传感器出厂检测试验;	增加项点: 1.永磁电机增加了旋转变压器绝缘性能测试、旋转变压器与永磁电机之间零位角度测量、空载反电势试验、稳态短路试验; 2.速度传感器检查相关工作换成旋转变压器检查相关工作; 3.电机解体后, 需要避免转子对外的电磁辐射与干扰。

#### 4 结论

本文从主电路结构、永磁同步电机结构、关键技术、保护措施以及运营维护等方面对永磁同步牵引系统进行了具体的分析, 作为第三代轨道交通牵引技术, 永磁牵引系统高功率密度有着明显的优势, 若采用 SiC 牵引变流器, 变流器箱体尺寸和重量将减小, 电机重量减小, 采用自通风方式。积极推动永磁牵引系统在城市轨道交通车辆的批量应用推广, 有助于轨道交通行业节能减排技术的发展。

#### 参考文献

- [1] 张济民, 苏辉, 任乔, 李伟, 周和超. 轨道交通永磁同步牵引系统发展概况与关键技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(06).
- [2] 屈斌, 詹哲军, 吉志伟, 袁畅. 高速列车永磁同步牵引系统研究与应用[J]. 铁道机车与动车, 2021(S1): 20-24+32+6.
- [3] 钱曙杰. 轨道交通新型永磁同步牵引电机的设计与比较[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(07).
- [4] 吴江权, 王春燕, 李坤, 陈致初, 胡勇峰. 永磁同步牵引电机

绕组最高温升抑制方法研究[J]. 防爆电机, 2020, 55(04): 37-41.

- [5] 邹档兵, 刘大, 丁懿. 基于永磁电机的高速动车组牵引变流器的研制[J]. 机车电传动, 2020(02).
- [6] 朱丹. 交直交牵引试验系统研究[D]. 大连交通大学, 2016.

收稿日期: 2021年3月9日

出刊日期: 2022年5月11日

引用本文: 金四虎, 浅析城市轨道交通永磁牵引系统技术[J]. 国际机械工程, 2022, 1(1): 9-12  
DOI: 10.12208/j. ijme.20220003

检索信息: 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

版权声明: ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS